

Ralph Stelzer · Karl-Heinrich Grote · Klaus Brökel
Frank Rieg · Jörg Feldhusen (Hrsg.)

ENTWERFEN ENTWICKELN ERLEBEN

Methoden und Werkzeuge in der Produktentwicklung



**10. Gemeinsames Kolloquium Konstruktionstechnik
KT2012 | Residenzschloss Dresden | 14.–15. Juni 2012**

Stelzer · Grote · Brökel · Rieg · Feldhusen (Hrsg.)

ENTWERFEN ENTWICKELN ERLEBEN

Methoden und Werkzeuge in der Produktentwicklung

10. Gemeinsames Kolloquium Konstruktionstechnik KT2012

Ralph Stelzer · Karl-Heinrich Grote · Klaus Brökel
Frank Rieg · Jörg Feldhusen (Hrsg.)

ENTWERFEN ENTWICKELN ERLEBEN

Methoden und Werkzeuge in der Produktentwicklung

Entwickeln – Entwerfen – Erleben.
Methoden und Werkzeuge in der Produktentwicklung
10. Gemeinsames Kolloquium Konstruktionstechnik (KT2012)

Herausgeber:

Prof. Dr. Ralph Stelzer (Technische Universität Dresden)
Prof. Dr. Karl-Heinrich Grote (Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg)
Prof. Dr. Klaus Brökel (Universität Rostock)
Prof. Dr. Frank Rieg (Universität Bayreuth)
Prof. Dr. Jörg Feldhusen (RWTH Aachen)

Wir bedanken uns für die Unterstützung bei
ma design, Tedata, Continental, xPLM, B.I.M. Consulting und Reiss Büromöbel

ma design
//ENGINEERING

Continental 

B.I.M.
consulting

TEDATA

xPLM
Solution

REISS

Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek
Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der
Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind
im Internet über <http://dnb.d-nb.de> abrufbar.

Bibliographic information published by the Deutsche Nationalbibliothek
The Deutsche Nationalbibliothek lists this publication in the Deutsche
Nationalbibliografie; detailed bibliographic data are available in the
Internet at <http://dnb.d-nb.de>.

ISBN 987-3-942710-80-0

© 2012 TUDpress
Verlag der Wissenschaften GmbH
Bergstr. 70 | D-01069 Dresden
Tel.: 0351/47 96 97 20 | Fax: 0351/47 96 08 19
<http://www.tudpress.de>

Alle Rechte vorbehalten. All rights reserved.
Layout und Satz: Sandra Olbrich/Technische Universität Dresden.
Umschlaggestaltung: TU Dresden, Illustration Audi A6 Limousine © 2012 Audi AG

Petra Hoske, Günter Kunze, Kai Bürkle,
Martin Schmauder, Mark Brütting & Christian Böser

Interaktiver Simulator für mobile Arbeitsmaschinen – Virtuelle Prototypen im Einsatzkontext erleben

Beim Einsatz mobiler Arbeitsmaschinen bestimmt der Maschinenführer die Arbeitsleistung und -sicherheit wesentlich mit. Er muss in die Lage versetzt werden, die Maschine ohne Gefahr für sich und andere zu steuern und ihr Leistungspotential voll zu nutzen. Deshalb sind Maschinenführer als reale oder virtuelle Bediener frühzeitig in die Maschinenentwicklung mit einzubeziehen.

In einem global härter werdenden Markt reichen den Herstellern empirische Untersuchungen allein nicht mehr aus. Die Zusammenhänge im System Bediener-Maschine-Prozess sollen möglichst objektiv und reproduzierbar erfasst werden. Das kann aufwändige experimentelle Untersuchungen erfordern. Der Bau realer Testmaschinen und ihre Ausstattung mit Messtechnik kosten viel Zeit und Geld. Reale Einsatzversuche sind oft nicht unter gleich bleibenden Bedingungen durchführbar, was die Auswertung erschwert. Hingegen bieten Werkzeuge der Simulation und Virtuellen Realität eine effiziente Möglichkeit, Maschinenführer in frühen Phasen der Produktentwicklung mit einzubeziehen.

1 Interaktiver Maschinensimulator der TU Dresden

Im interaktiven Maschinensimulator der TU Dresden (Abbildung 1) können Testfahrer mit virtuellen Maschinen Arbeitsaufgaben in virtuellen Szenarien erledigen. Dabei lassen sich auch kritische Situationen gefahrlos untersuchen (Gubsch et. al. 2010). Umgebungsbedingungen und Systemparameter werden innerhalb einer gegebenen Variationsbreite festgelegt, was die Wiederholung und Re-

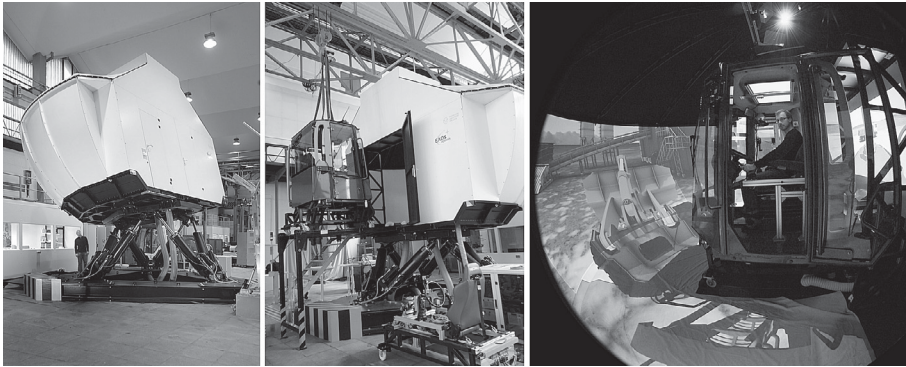


Abbildung 1 (oben): Interaktiver Maschinensimulator der TU Dresden

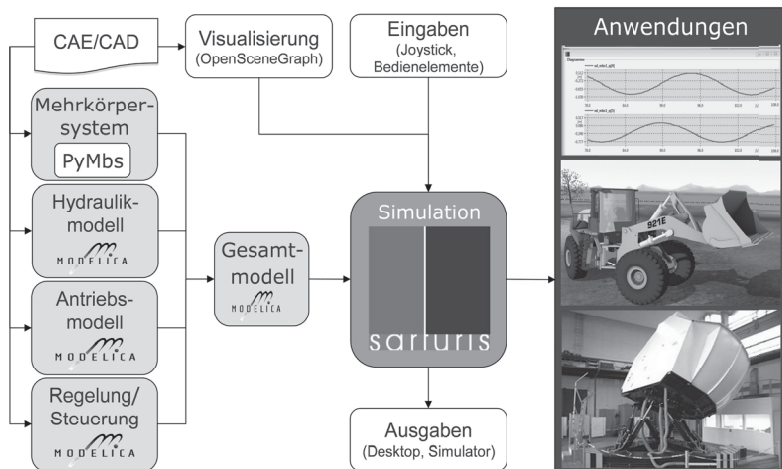


Abbildung 2 (unten): Software-Framework SARTURIS

produktion von Experimenten ermöglicht. Bei den Untersuchungen werden ausgewählte Verhaltensmerkmale der Probanden direkt mit Messtechnik (Blick- und Bewegungsverhalten) und indirekt über aufgezeichnete Maschinendaten (Fahrverhalten) erfasst. Insgesamt ist eine objektivierte Bewertung von Maschinen im Einsatz möglich.

Der Simulator der TU Dresden besteht aus einer Kabine, welche auf einem Bewegungssystem montiert ist. In die Simulatorkabine lassen sich reale Führerhäuser mit originalen oder prototypischen Bedien- und Anzeigeelementen verschiedener Maschinentypen einbauen. Beamer projizieren computergenerierte Darstellungen der Arbeitsumgebung einschließlich sichtbarer Maschinenteile auf eine gewölbte Wand. Ein Soundsystem erzeugt zugehörige Geräusche. Die beim Fahren und Arbeiten auftretenden Bewegungen, Beschleunigungen und Maschinenschwingungen werden über das Bewegungssystem nachgebildet. Somit kann ein Maschinenführer die virtuelle Arbeitsmaschine über seine Sinne für Sehen, Hören, Gleichgewicht und Fühlen erleben. Durch die Interaktion mit der Maschine und der Umwelt bestimmt er den Arbeitsprozess und das Maschinen- sowie Umweltverhalten mit.

2 Eigene Weiterentwicklung des interaktiven Maschinensimulators

Der Maschinensimulator der TU Dresden ist ein Forschungs- und Entwicklungssimulator. Für die interaktive Maschinensimulation in Echtzeit wurde am Lehrstuhl für Baumaschinen- und Fördertechnik das Programmsystem SARTURIS entwickelt (BMBF-Förderung). SARTURIS ist kein abgeschlossenes Simulationsprogramm, sondern bildet den Rahmen für individuelle Softwarekomponenten (Kunze et. al. 2010b, Abbildung 2). Mit PyMbs ist ein Softwarewerkzeug integriert, das Bewegungsgleichungen von Mehrkörpersystemen generiert. Es erzeugt aus einer Modellbeschreibung simulationsfähigen Code für verschiedene Zielplattformen, wie z.B. Matlab/SimulinkR, C/C++, Fortran, Python oder Modelica (Kunze et. al. 2009). Ein MKS-Modell lässt sich damit nativ in ein existierendes Modell anderer physikalischer Domänen einbinden.

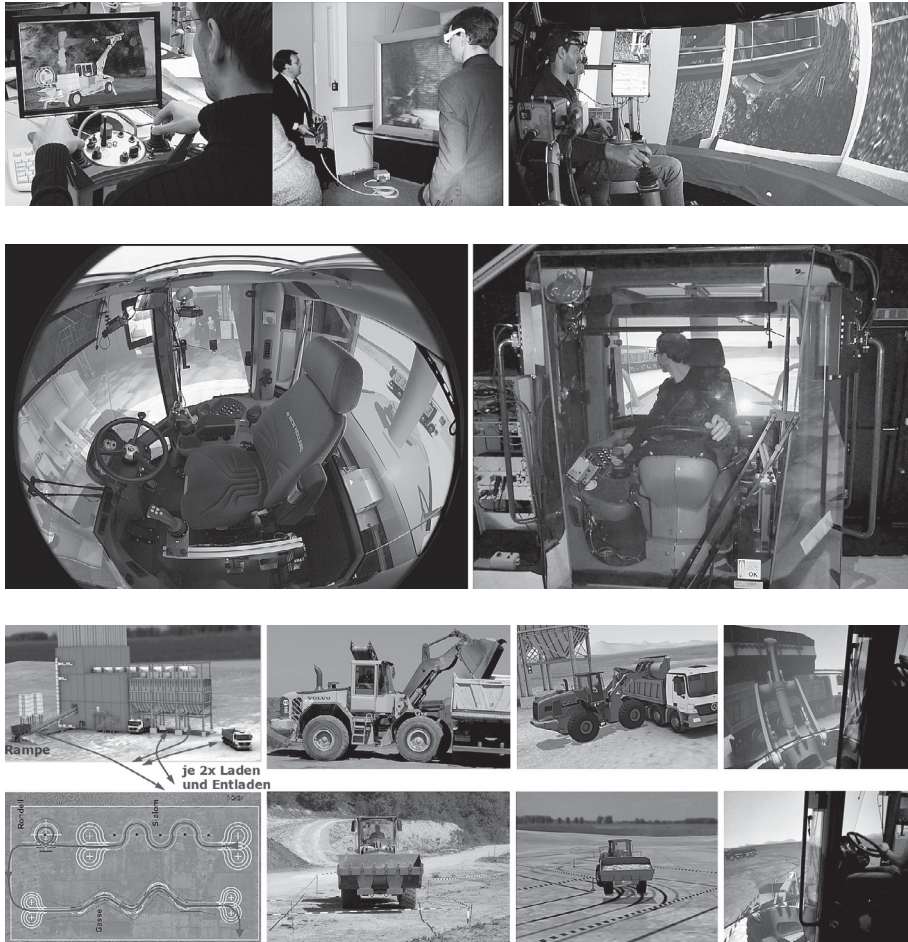


Abbildung 3 (obere Reihe): Beispiele für mit SARTURIS entwickelte Maschinensimulationen, links: Betonspritzmaschine mit originaler Fernbedienung und Stereoprojektion, rechts: Bedienstand Schaufelradbagger

Abbildung 4 (mittlere Reihe): Erweiterung der Fahrersicht nach unten und hinten zur Realisierung typischer Arbeitsprozesse (Y-Spiel beim Radlader)

Abbildung 5 (untere beiden Reihen): Beispiele für neue Arbeitsszenarien im Simulator, oben: Szenario Ladespiel mit realer Szene, Außensicht Simulator, Probandensicht, unten: Szenario Fahrstrecke mit realer Szene, Außensicht Simulator, Probandensicht

SARTURIS simuliert das Verhalten mobiler Arbeitsmaschinen unter Einsatz strukturmehchanischer Modelle (MKS) in Kombination mit domänenübergreifenden Modellen für den Antrieb und die Hydraulik, einschließlich der Steuerung und Regelung (Schubert et. al. 2010, 2011). Im Gegensatz dazu bilden spezialisierte Trainingssimulatoren die als bekannt empfundenen Verhaltensweisen des simulierten Systems mit vereinfachten Methoden ab (z. B. Kennfelder). Weitere SARTURIS-Module sind für die Visualisierung (OpenScene-Graph), die Ein- (Joystick, Bedienelemente) und Ausgabe (Desktop, Simulator) zuständig. Mit SARTURIS lassen sich Simulationslösungen für unterschiedlichste Maschinensysteme entwickeln, die unter verschiedenen Hardwarekonfigurationen von VR-Umgebungen laufen (Abbildung 3).

Neben der Forschung an Simulations- und VR-Technologien für mobile Arbeitsmaschinen wird der Simulator für Untersuchungen an den Maschinen selbst eingesetzt. Dazu gehören Analysen zum Fahrverhalten bei Radladern und zu Bedienkonzepten bei Kompaktladern. Weitere Forschungsarbeiten beschäftigen sich mit Methoden zur Bewertung der Fahrersicht im Arbeitsprozess und mit Informationsschnittstellen in Führerkabinen von Schaufelradbaggern. Mit den konkreten Aufgaben wurde es notwendig und mit SARTURIS möglich, den Maschinensimulator kontinuierlich auszubauen. Dazu zählen

- drei Fahrerkabinen/–stände mit flexiblen Bedienelementen
- weitere Projektionsflächen nach unten und hinten
- eine Methode zur Verzerrungskorrektur bei der Projektion auf eine doppelt gekrümmte Fläche (einschließlich Beamerkalibrierung)
- die indirekte Beleuchtung des Fahrerarbeitsplatzes
- maschinenspezifische Arbeitsszenarien mit Fremdverkehr (Abbildung 5)
- weitere Umweltinteraktionen (Kollisionen, Materialhandhabung)
- eine PyMbs-Eingabeschicht zur visuellen Modellierung kinematischer Systeme
- Messsysteme zur Erfassung des Bedienerverhaltens
- Synchronisationswerkzeuge für Mess- und Log-Daten

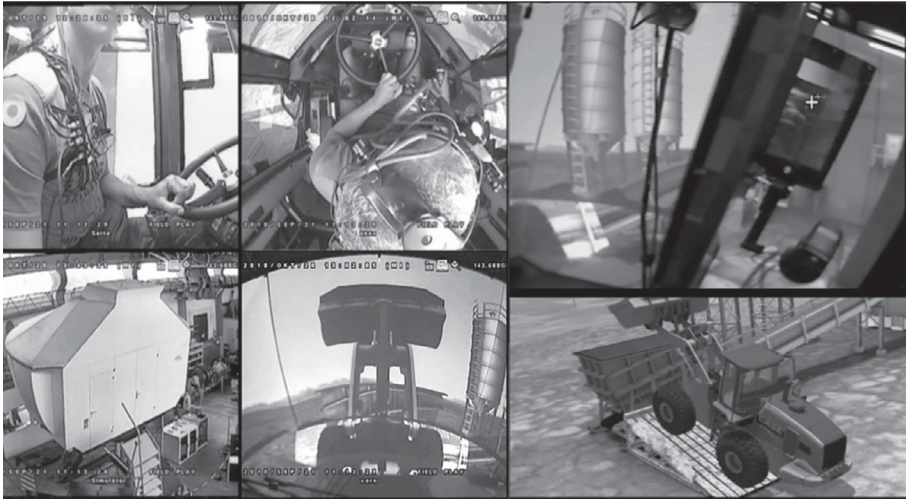


Abbildung 6 (obere Reihe): Eine Versuchsszene im interaktiven Maschinensimulator aus verschiedenen Sichten, oben: Seitenansicht und Draufsicht Proband, Eye-Link-Video mit Fixationen, unten: Maschinensimulator, Virtuelle Umgebung, Außensicht auf Arbeitsprozess

Abbildung 7 (untere Reihe) :Im Simulator eingesetzte Messsysteme zur Erfassung des Fahrerhaltens, links: EyeLink-System zur Blickerfassung, rechts: CUELA-System zur Erfassung der Bewegungen über gemessene Körperwinkel, mittig oben: Adaption der CUELA Kopfsensoren am Blickerfassungssystem

3 Messsysteme zur Erfassung des Bedienerverhaltens

Auf Grund der Forderung nach objektiven und reproduzierbaren Untersuchungen zum Bedienerverhalten werden im Simulator verschiedene Messsysteme eingesetzt, während die Probanden vorgegebene Arbeitsaufgaben erledigen (Abbildung 6).

Ein Mehrkamarasystem zeichnet die VR-Umgebung (projiziertes Umgebungsmodell, Fahrerkabine) und den Testfahrer aus verschiedenen Perspektiven auf (Bürkle et. al. 2011a). Neben der Dokumentation der Versuche lassen sich damit autarke, nicht vernetzte Messsysteme bildbasiert synchronisieren. In der Regel wird aber die Messtechnik in das Simulatornetzwerk mit eingebunden. Die Synchronisation der Daten basiert dabei auf gesendeten Nachrichten oder elektrischen Signalen.

Die Bewegungen der Probanden werden durch ein mechanisch/elektronisches System über gemessene Körperwinkel erfasst (Abbildung 7 rechts). Das CUELA-System (Computer-Unterstützte Erfassung und Langzeit-Analyse von Belastungen des Muskel-Skelett-Systems) wird vom Institut für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin der Deutschen Gesetzlichen Unfallversicherung (IFA) entwickelt und betrieben (IFA 2012). Im Simulator kommt eine speziell zur Registrierung der Kopfneigung und -torsion entwickelte prototypische Systemvariante zum Einsatz.

In Zusammenarbeit mit den Ingenieurpsychologen der TU Dresden werden die Blickbewegungen der Bediener mit dem Eye-Tracking-System EyeLink II aufgezeichnet (Abbildung 7 links). Aus Fixationen lassen sich Rückschlüsse auf arbeitsbedingte Sehziele ziehen. Ein weiteres Sichtmerkmal sind Bewegungen des Auges beim Ausrichten auf ein neues Objekt (Sakkaden). Aus Fixationen und Sakkaden leiten die Psychologen Aussagen zur Gefahrenwahrnehmung ab.

Der Simulationsrechner zeichnet die Schaltzustände der Bedienelemente, die Maschinendaten (zeitabhängige Positionen, Beschleunigungen / Geschwindigkeiten, Zylinderkräfte usw.) und Umweltaktionen synchron zu den Messungen auf. Sie ermöglichen die Reproduktion der Arbeitsspiele und erlauben Rückschlüsse auf den Fahrertyp

über Prozessparameter. Damit sind die Grundlagen für eine reproduzierbare Bewertung des Bedienerverhaltens gelegt.

4 Validierung von Untersuchungen in der Virtuellen Realität

Abhängig vom Untersuchungsziel müssen VR-Systeme die Parameter der Realität von physikalisch plausibel bis nahezu physikalisch korrekt abbilden. Diese sind zu validieren. Physikalische Größen, die auf dem Simulationsmodell und der Übertragungsfunktion der Hardwareschicht beruhen, können am Simulator selbst gemessen werden. Auf diese Weise erfolgte eine Analyse des Übertragungsverhaltens für Geschwindigkeiten und Beschleunigungen. Sie dient als Grundlage für Untersuchungen zur Wahrnehmung der Maschinendynamik durch Maschinenführer.

Bis zu 90 Prozent aller Informationen für Fahr- und Arbeitsaufgaben nehmen Bediener über ihren optischen Sinneskanal auf. Sichtuntersuchungen im Simulator sind jedoch von den Rahmenbedingungen abhängig, die das vorhandene Führerhaus und das Projektionssystem für das Umgebungsmodell schaffen. Deshalb kann die Validierung virtueller Untersuchungen nur an Hand des Probandenverhaltens (Körper- und Blickbewegungen) unter vergleichbaren Arbeitsbedingungen erfolgen. Aus diesem Grund wurden Körperhaltungen und Sehziele in gleichen Einsatzszenarien mit realen Maschinen erfasst (Abbildung 8). Es bestand eine hohe Korrelation der Verhaltensmuster im Simulator mit denen in der Realität, wie z. B. bei Körperbewegungen für bestimmte Sehziele (Abbildung 9).

5 Datenauswertung in Entwurfswerkzeugen aus der Produktentwicklung

5.1 Systemüberblick zum Datentransfer in Entwurfswerkzeuge

Bei den Untersuchungen in der Virtuellen Realität ergeben sich durch Messung, Logging und Videoaufzeichnung enorm große Datensätze. Die im Simulator eingesetzten Aufnahmesysteme besitzen selbst Auswertesoftware, die normalerweise zur Datenaufbereitung allein



Abbildung 8 (obere Reihe): Untersuchungen zur Fahrersicht in realen Arbeitsprozessen, links: Aufnahme des Fahrers und der Maschine mit einem Mehrkameranystem, rechts: Bewegungserfassung des Fahrers mit dem CUELA-System

Abbildung 9 (untere Reihe): Überblendung von realen und virtuellen Versuchsszenarien mit markierter Blickrichtung

genutzt wird. Abbildung 10 zeigt Beispiele für die spezifische Auswertung von Maschinen-, Blick- und Körperbewegungen.

In einem DFG-Projekt zur »Fahrersicht-Dynamik« (Kunze et. al. 2008 und 2010a) gehen die TU Dresden (Professuren: Arbeitswissenschaft, Baumaschinen- und Fördertechnik) und das IFA einen Schritt weiter. Die erfassten Daten werden in Entwurfswerkzeugen aus der Produktentwicklung, wie Menschmodellsoftware, 3D-Modellierungssoftware oder CAD-System, zusammengeführt (Abbildung 11). Bedingung dafür ist, dass diese das Gesamtsystem aus Mensch-Maschine-Prozess abbilden können. Die gemeinsame Auswertung von Daten zu Mensch, Maschine und Prozess in einem Entwurfswerkzeug hat folgende Vorteile:



Abbildung 10 (obere Reihe): Auswertung von Maschinen-, Blick- und Bewegungsdaten mit spezialisierter Software: links: xy-Plott der Fahrstrecke mit Gasse, Slalom, Rondell und Y-Spiel / pinacolada, mittig: Fixation auf ein Hindernis im Rückspiegel / SceneLink, rechts: Verteilung der Halstorsion bei Fahrten durch das Rondell / WIDAAN (eine Fahrt in Gegenrichtung) (Böser et. al. 2011, Brütting et. al. 2011)

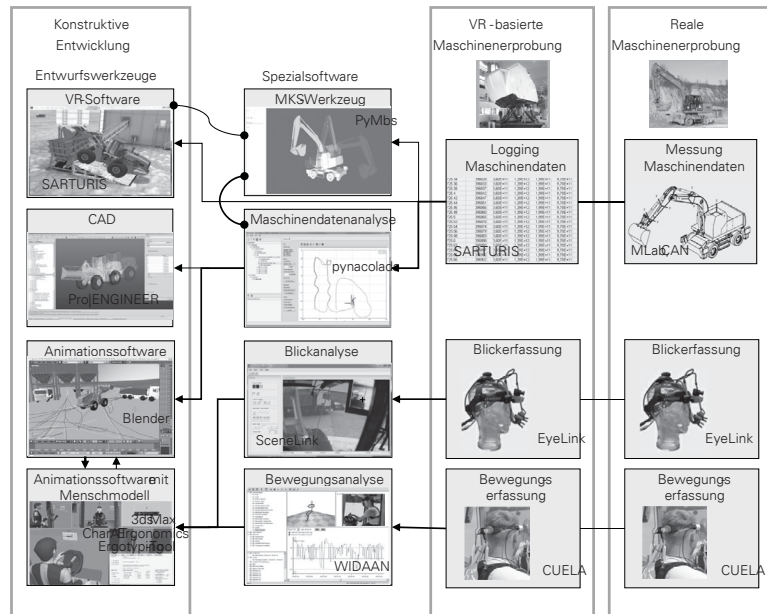


Abbildung 11 (unteres Bild): Werkzeuge für die Prozessanalyse in ausgewählten Stufen der Produktentwicklung am Beispiel des DFG-Projekts „Fahrsicht-Dynamik“ (Kunze et. al. 2008), Eigenentwicklung TU Dresden: SARTURIS, PyMbs, pynacolada, Mitentwicklung durch TU Dresden: CharAT Ergonomics, Ergotyping®-Tool, Eigenentwicklung Institut für Arbeitsschutz: CUELA, WIDAAN

- Komplexe Zusammenhänge im System Mensch-Maschine-Prozess sind analytisch fassbar.
- Einflussparameter sind variierbar und exakt einstellbar.
- Das Potential der Entwicklungswerkzeuge für die Bewertung wird genutzt.
- Durch Ausweitung der Untersuchungsbedingungen auf Nutzerkollektive und andere Maschinenkonstruktionen entsteht ein Mehrwert (Offlinesimulation).
- Die Produktentwicklung ist an der Quelle beeinflussbar. Die in frühen Phasen eingesetzten Entwicklungswerkzeuge werden gleichzeitig weiterentwickelt.

Im Rahmen des DFG-Projekts zur »Fahrersicht-Dynamik« werden Schnittstellen und Workflows für den Datentransfer aus spezifischen Auswerteprogrammen in Entwurfswerkzeuge entwickelt und getestet. Das schließt Synchronisationsmethoden mit ein. Der Transfer erfolgt in drei Etappen:

1. Überführen von Körper- und Blickbewegungen auf ein repräsentatives, exakt positioniertes digitales Menschmodell
2. Aufbereiten von prozessbezogenen Maschinen- und Umgebungsdaten
3. Zusammenführen von prozessbezogenen Mensch-, Maschinen-, und Umgebungsdaten in 3D-Entwurfswerkzeugen

5.2 Überführen von Körper- und Blickbewegungen auf ein digitales Menschmodell

Die im Simulator agierenden Versuchspersonen weisen individuelle Körpermaße und eine für die Sehaufgaben typische Körpermotorik auf. Für weiterführende Untersuchungen mit digitalen Menschmodellen müssen diese Anthropometrie- und Bewegungsdaten auf die Menschmodelle übertragen werden, um ein exaktes virtuelles Abbild der Versuchspersonen zu erzeugen (Bürkle et. al. 2011b). Neben der Vermessung der Probanden (Abbildung 12 links) sind deren individuelle Sitzhaltungen (Abbildung 12 rechts) und die Zuordnung zu Mensch-Maschine-Schnittstellen (Bedienelemente etc.) mess-

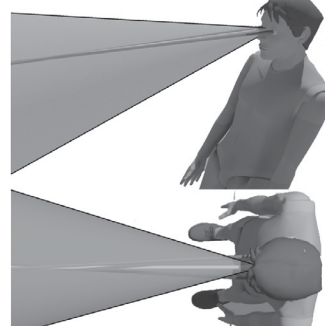
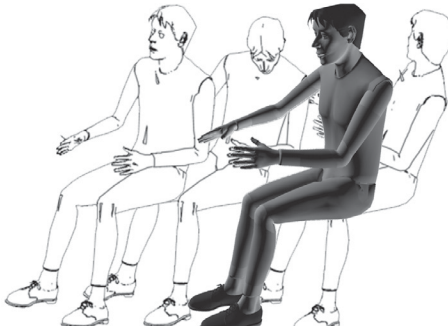
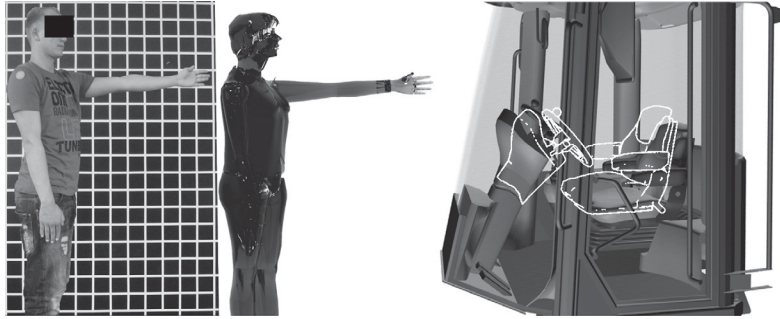


Abbildung 12 (obere Reihe): Übertragen gemessener Körpermaße und der Sitzposition auf Menschmodelle, links: Bildbasierte und iterative Modifikation eines Menschmodells, rechts: Individuelle Einstellungen eines Sitzes

Abbildung 13 (mittlere Reihe): Import von CUELA-Daten in die Bewegungssteuerung des Menschmodells, links: Haltungssequenzen des Menschmodells, rechts: Verknüpfung des Blickfelds mit den Kopfbewegungen

Abbildung 14 (untere Reihe): Gegenüberstellung realer und virtueller Körperbewegungen

technisch zu erfassen und in digitale Modelle zu übertragen. Als Entwicklungsplattform kommt die auf 3ds Max basierende Menschmodellsoftware CharAT Ergonomics zum Einsatz.

Für den Import der an realen Personen gemessenen Gelenkwinkel auf das Menschmodell wurde ein Skript entwickelt (Böser et. al. 2011). Die mit CUELA aufgezeichneten Daten werden damit in die Bewegungssteuerung des Menschmodells überführt (Abbildung 13 links). Mit dem so konfigurierten Menschmodell ist es möglich, Rückschlüsse auf die Raumkoordinaten der virtuellen Augpunkte zu ziehen. Diese bilden den Startpunkt für das Blickfeld, dass damit direkt mit den Kopfbewegungen verknüpft ist (Abbildung 13 rechts). Das Blickfeld repräsentiert denjenigen Bereich, innerhalb dessen Objekte allein durch die Ausrichtung der Augen in angenehmer Weise fixiert werden können.

Im Ergebnis dieses Bearbeitungsschritts ist die Gegenüberstellung von Bewegungen realer Probanden und denen der Menschmodelle möglich (Abbildung 14). Dabei wurde festgestellt, dass feinste Körperbewegungen, z.B. durch Querbeschleunigungen aufgrund unebener Terrains, hinreichend genau übertragen werden.

Zusätzlich werden Rohdaten des Eye-Tracking-Systems (EyeLink II) für die Augenbewegungen (Okulomotorik) verarbeitet und auf das bereits körperlich animierte digitale Menschmodell übertragen (Abbildung 15). Eine hierfür entwickelte skriptbasierte Datenaufbereitung liefert die von Sakkaden- und Blink-Ereignissen (Blicksprünge, Blinzeln) bereinigten, framegenauen Koordinaten zur Bestimmung der Richtung von Sehstrahlvektoren. Das Skript berücksichtigt dabei unterschiedliche Frameraten der eingesetzten Messsysteme sowie Modellierungssoftware und filtert projektrelevante Arten der Okulomotorik aus enorm großen Eye-Tracking-Datensätzen.

Ergebnis der ersten Etappe des Datentransfers ist eine in die virtuelle Welt übertragene menschliche Verhaltensdynamik, die aber noch keine Rückschlüsse auf den Prozess zulässt.

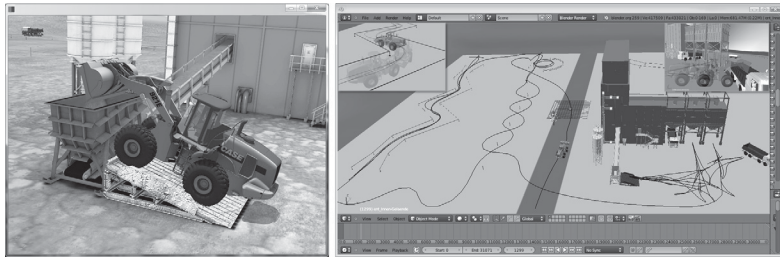
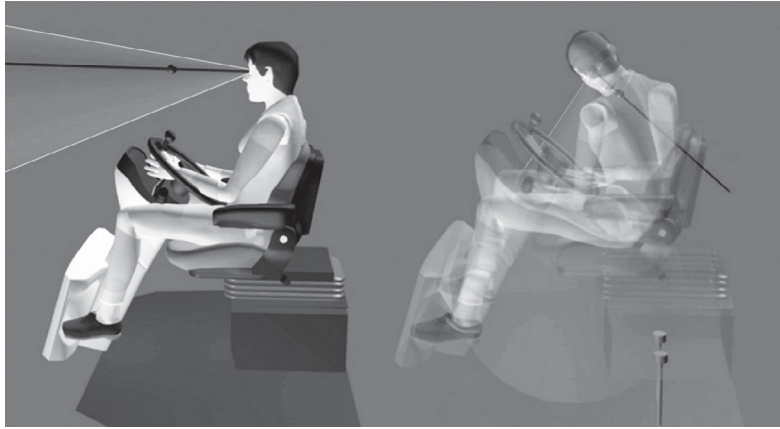


Abbildung 15 (oberes Bild): Animation von Körper- und Blickbewegung in der Menschmodellsoftware CharAT Ergonomics

Abbildung 16 (untere Reihe): Animation der im interaktiven Maschinensimulator mitgeloggten Testfahrten, links: Maschinanimation in der VR-Software Sarturis, rechts: Maschinanimation in der Animationssoftware Blender mit Ortskurve

5.3 Aufbereiten von prozessbezogenen Maschinen- und Umgebungsdaten

In der VR-Software SARTURIS lassen sich aufgezeichnete Maschinenbewegungen unmittelbar abspielen (Abbildung 16 links). Um alle Prozessdaten zusammenführen zu können, müssen Maschinendaten für eine Computergrafik- und Animationsplattform aufbereitet werden. Als Transferwerkzeug wurde Blender (Open Source) aus-

gewählt, da die computergrafische Entwicklung für den Simulator ebenfalls darauf basiert und eine Python-Schnittstelle für die Skriptentwicklung existiert (Abbildung 16 rechts). Zudem bietet Blender eine Exportfunktion für komplette Animationen nach 3ds Max.

Bei der Maschinensimulation im Simulator werden die Werte generalisierter Koordinaten des Mehrkörpersystems mitgeloggt. Damit lassen sich die Systemzustände einer Baumaschine vollständig beschreiben. Für den Import in die Computergrafikplattform werden sie in kartesische Raumkoordinaten der Einzelkörper umgewandelt. Umgebungsdaten liegen bereits in dieser Form vor. Zu weiteren Maßnahmen der Daten-Vorverarbeitung zählen die Interpolation auf eine definierte Framerate, das Splitting in Prozessschritte und die Daten-Synchronisation. Für das Einlesen und Weiterverarbeiten aller Informationen wurden Skripte entwickelt. Ergebnis des Datentransfers ist eine Keyframe Animation von Maschine und Umgebung in Blender, die als Grundlage für den Import in 3ds Max dient.

Zusätzlich wurde der Datentransfer in das CAD-Programm ProENGINEER getestet. Dazu ist der Radlader im CAD aus geeigneten Einzelkörpern abzubilden, die untereinander durch Gelenke verbunden sind. Mit dem internen Dynamik-Tool MECHANISM werden Aktuatoren für die Bewegungsvorgabe definiert. Die Parameterwerte der Aktuatoren entsprechen den im Simulator aufgezeichneten Werten für die generalisierten Koordinaten. Sie werden als Ansi- oder Excel-Datei eingelesen, wobei der Zeitschritt vorzugeben ist. Daraus resultiert eine Maschinenanimation im CAD, die auf Fahrversuchen im Simulator oder mit realen Maschinen beruht.

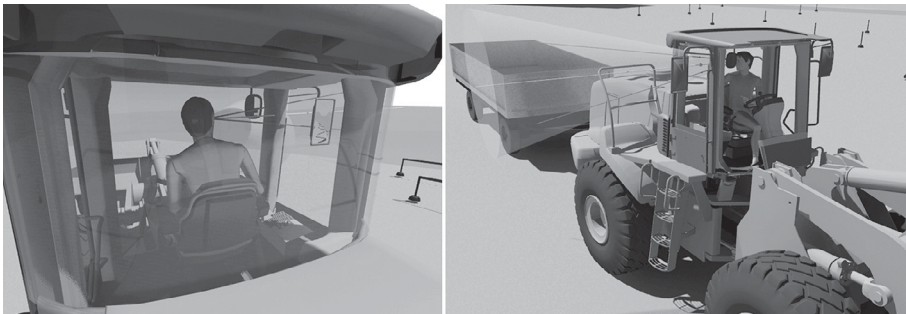
Auch in realen Maschineneinsätzen (Radlader, Bagger) wurden Positionskenngößen ausgewählter Maschinenkomponenten sensorisch erfasst. Die Umwandlung der Messdaten in generalisierte Koordinatenwerte erfolgte per Skript (MATLAB, Python). Damit lassen sich Maschinenbewegungen im Visualisierungstool des Mehrkörpersimulationswerkzeugs PyMbs animieren. Mit den bereits beschriebenen Methoden ist das ebenso im CAD (ProENGINEER) und in Computergrafiksoftware (Blender, 3ds Max) möglich.

5.4 Zusammenführen von prozessbezogenen Mensch-, Maschinen-, und Umgebungsdaten in 3D-Entwurfswerkzeugen

In der dritten Etappe des Workflows sind menschliche und maschinelle Arbeitsprozesse in einer virtuellen Umgebung zusammenzuführen. Dazu werden die animierten Mensch-, Maschinen- und Umgebungsmodelle auf Basis von Synchronisationssignalen in eine gemeinsame Datei der Entwurfsplattform importiert. Abbildung 17 zeigt verschiedene Arbeitsszenarien in 3ds Max und CharAT Ergonomics, die auf Versuchen im interaktiven Maschinensimulator basieren.

Auf die gleiche Weise können Arbeitsprozesse realer Maschinen in virtuellen Umgebungen abgebildet werden. Die Ausrüstung von Maschinen mit Sensoren und der Fahrer mit Messsystemen sind jedoch wesentlich aufwendiger. Der Datentransfer aus dem realen Umfeld in ein Entwurfswerkzeug wurde separat erfolgreich getestet.

In den Entwurfswerkzeugen selbst können durch Variation von Nutzerkollektiven und Veränderung der Maschinenkonstruktion weiterführende Experimente durchgeführt werden. Hintergrund ist die Bewertung von Entwürfen hinsichtlich ihrer globalen Markteignung und eine vorausschauende Betrachtung der Wirkung konstruktiver Änderungen.



5.5 Werkzeuge für die Bewertung des Fahrerverhaltens

Um die Produktentwicklung zu beeinflussen, werden Werkzeuge für die Analyse und Bewertung des Fahrerverhaltens entwickelt.

Die gekoppelte Animation von Mensch- und Maschinenmodellen in 3ds Max und CharAT Ergonomics schafft die Möglichkeit, prozesskritische Sehziele zu identifizieren. Dazu wird ein skriptbasiertes Tool (Scherstjanoi et. al. 2012b) eingesetzt, das Kollisionen dynamischer Sehobjekte (Sehstrahl) mit 3D-Objekten von Maschine und Umgebung markiert und nach Zeit, Ort und Häufigkeit klassifiziert. Beliebige Objekte lassen sich dabei auf ihre prozesskritische Relevanz hinsichtlich direkter und/oder indirekter Sicht untersuchen. Fixationsstrahlen werden nach den Kriterien »Kollision mit sichtverdeckendem Material«, »keine Sichtbehinderung durch Glas« oder »indirekte Sicht über Spiegel« unterschieden und ausgezählt (Abbildung 18 links). Damit ist eine Wichtung von Sehraumabschnitten im Einsatzkontext der untersuchten Baumaschine möglich. Solche Wichtungen können auch für Konstruktionsobjekte selbst ermittelt werden (Abbildung 18 rechts).

Neben den Sehstrahlen müssen auch Körperhaltungsanalysen in die Auswertung einbezogen werden. Kompensationsbewegungen lassen auf ungünstige Sichtbedingungen schließen. Ein Hinweis dazu ergibt sich aus der Rückentorsion bei verschiedenen Arbeits-



Abbildung 17: Import von Daten menschlicher und maschineller Arbeitsprozesse in eine Entwurfsplattform (3ds Max und CharAT Ergonomics)

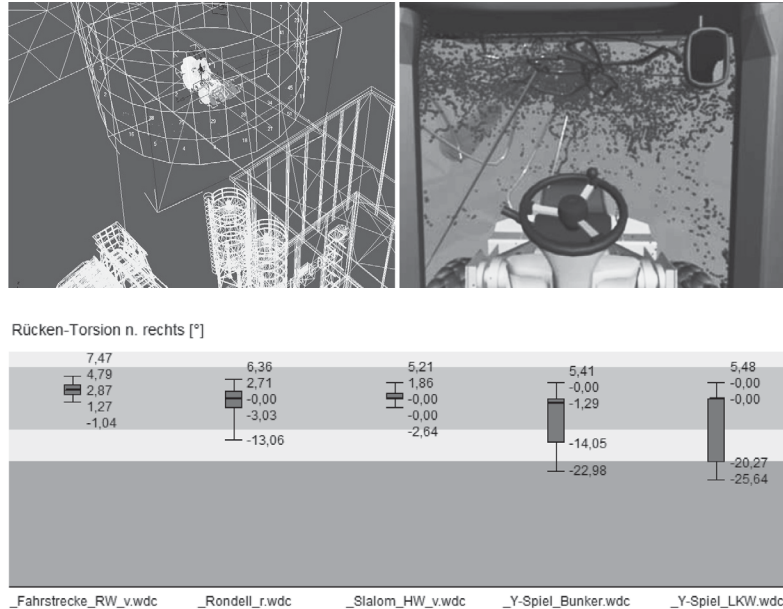


Abbildung 18 (obere Reihe): Auswertung von Sehstrahlen in 3ds Max, links: Max-Script zur Auswertung von Fixationen, Wichtung von Sehraumabschnitten, rechts: Verschneiden von Sehstrahlen mit der Frontscheibe eines Radladers

Abbildung 19 (unten): Boxplot der Rückentorsion nach rechts, Zwischenergebnis (Brütting et. al. 2011)

szenarien eines Radladers (Abbildung 19). Beim Y-Spiel zeigen sich erhöhte Werte. Hintergrund ist der hohe Rückfahranteil. Die Fahrer wollen sich, von der Abwesenheit an Kollisionsgefahren überzeugen. Die direkte Sicht nach hinten oder die indirekte Sicht über den Seitenspiegel erfordern eine tordierte Körperhaltung. Es wird erwartet, dass Assistenzsysteme für das Rückwärtsfahren eine Verbesserung für Ergonomie und Arbeitssicherheit bringen.

Angeregt durch die Arbeiten zur Fahrersicht-Dynamik entstanden neue Module in der Menschmodellsoftware CharAT Ergonomics. So wurde eine Steuerung implementiert, die einen Sehstrahl über sequentielle Bewegung von Augen, Kopf und Rumpf auf ein Sehobjekt ausrichten kann (Kamusella 2012a, Abbildung 20 links). Dabei ist eine Bewertung der Körperhaltung nach Ampelverfahren möglich

(Kamusella 2012b). Ein anderes Modul erlaubt die Sichtfeldauswertung nach ISO 5006 für beliebige Augpunktlagen eines Nutzerkollektivs (Scherstjanoi et. al. 2012a, Abbildung 20 rechts).

Zur Validierung des Datentransfers und zur Übergabe aufbereiteter Untersuchungsdaten an Dritte, erfolgte ein Rückimport von Augpunktlagen und Blickrichtungen aus dem Menschmodell nach Blender (Abbildung 21).

6 Zusammenfassung und Ausblick

In der Virtuellen Realität des interaktiven Maschinensimulators der TU Dresden lassen sich Zusammenhänge im System Mensch-Maschine-Prozess messtechnisch untersuchen. Die erfassten Daten werden bei der Aufbereitung und Auswertung in Entwurfswerkzeugen des Konstrukteurs (Menschmodellsoftware, CAD) miteinander gekoppelt, um das komplexe Gesamtsystem abbilden zu können.

Auf Grundlage des gesammelten Wissens wurden die in frühen Phasen der Produktentwicklung eingesetzten Entwurfswerkzeuge weiterentwickelt. Für Untersuchungen zur Fahrersicht-Dynamik sind prototypische Datenschnittstellen und Auswertewerkzeuge geschaffen worden. In CharAT Ergonomics wurden die Steuerung des Menschmodells über Sehstrahlen und eine auf Menschmodelle adaptierte Sichtauswertung nach ISO 5006 umgesetzt.

Weitere Entwicklungsansätze liegen in der Aufbereitung ermittelter Prozessdaten für den Konstrukteur. Dazu zählen die voneinander abhängigen prozesstypischen Maschinenstellungen / Körperhaltungen / Blickrichtungen bzw. Maschinen- / Körper- / Blickbewegungen.

Aufgezeichnete dynamische Maschinendaten liefern Aussagen zum Fahrverhalten. Auf dieser Grundlage lassen sich Fahrermodelle entwickeln, um bei der Simulation von Arbeitsmaschinen über Steuerungsparameter unterschiedliches Bedienerverhalten einfließen zu lassen. Damit sind bereits in frühen Entwicklungsphasen Prognosen zu fahrerspezifischen Einflüssen auf die Prozessleistung und Energiebilanz möglich.

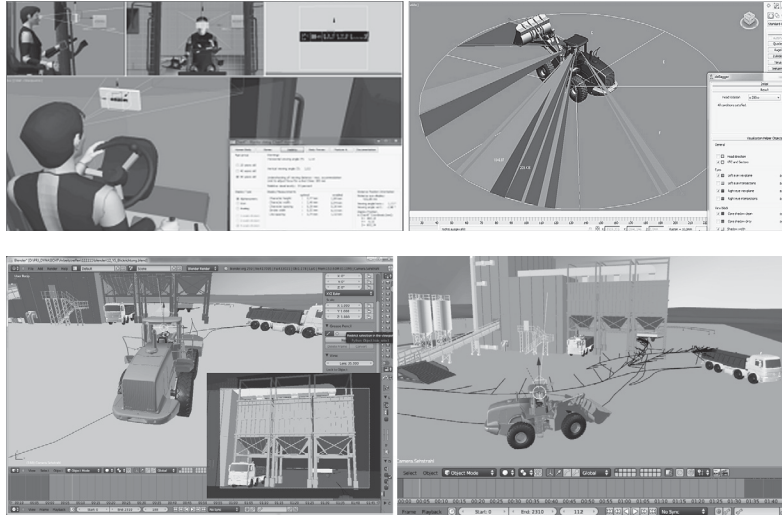


Abbildung 20 (obere Reihe): Neue Module für die Menschmodellsoftware CharAT Ergonomics, links: Steuerung zum Ausrichten eines Sehstrahls auf ein Sehbjekt und Bewertung von Sichtparametern mit dem Ergotyping®-Tool (Kamusella 2012a), rechts: Auswertung von Sichtverdeckungen nach ISO 5006 mit einer Maschine in Prozessstellung und bei der möglichen Kopffrotation (Scherstjanoi et. al. 2012a)

Abbildung 21 (untere Reihe): In Blender importierte und aufbereitete Augpunktlagen und Blickrichtungen, links: Außensicht auf Szene mit Sehstrahl und Fahrersicht, rechts: Außensicht auf Szene mit Sehstrahl und Ortskurve des Mittenauges mit Blickrichtungen

Literaturverzeichnis

- Böser, C.; Brütting, M.; Ellegast, R. 2011: Einsatz von VR zur Sichtfeldgestaltung von Baumaschinenführern. In IFA-Report 6/2011 – 4. Fachgespräche Ergonomie 2010, S. 19–24. Deutsche Gesetzliche Unfallversicherung e.V., Berlin.
- Brütting, M; Böser, C.; Ellegast, R. 2011: Präsentation von Teilergebnissen der Körperhaltungsanalyse bei Baumaschinenführern mit CUELA am 21.02.2011 in Dresden, unveröffentlicht.
- Bürkle, K.; Kamusella, C.; Hoske, P. 2011a: Methode zur prozess- und nutzerabhängigen Sichtanalyse bei mobilen Arbeitsmaschinen. In: Tagungsband zum Frühjahrskongress 2011 der Gesellschaft für Arbeitswissenschaft e.V. zum Thema „Mensch, Technik, Organisation – Vernetzung im Produktentstehungs- und -herstellungsprozess“. Chemnitz 23.-25.03.11

- Bürkle, K.; Schmauder, M.; Hoske, P.; Kunze, G. 2011b: Virtuelle Abbildung dynamischer Prozesse zur Sichtbewertung bei Erdbaumaschinen.
In: Technische Sicherheit, Heft 4/2011. Springer-VDI-Verlag, Düsseldorf
- Gubsch, I.; Hoske, P.; Bürkle, K. 2010: Untersuchung des Bedienerverhaltens in mobilen Baumaschinen durch interaktive Simulationen in virtuellen Umgebungen.
In: Tagungsunterlagen zum „Tag der Deutschen Baumaschinentechnik 2010“ des Hauptverbands der Deutschen Bauindustrie e.V. – Anwendungskompetenz Baumaschinentechnik Erfolgsgarant der Deutschen Bauindustrie.
Meerane, 26.10.2010
- Institut für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin der Deutschen Gesetzlichen Unfallversicherung (IFA ehemals BIA) 2012: Das CUELA-Messsystem, Information des Berufsgenossenschaftlichen Instituts für Arbeitsschutz – BIA, Sankt Augustin. <http://www.dguv.de/ifa/de/fac/ergonomie/pdf/text1a.pdf>, veröffentlicht 2003, abgerufen am 10.04.2012
- Kamusella, C. 2012a: Ergotyping®-Tools zur Unterstützung von Konstrukteuren bei der Umsetzung von Ergonomieaspekten in frühen Entwicklungsphasen. Institutskolloquium TU Dresden, Institut für Technische Logistik und Arbeitssysteme, S. 40–54
- Kamusella, C. 2012b: Ergotyping-Tool „Körperhaltungsbewertung“. In Dokumentation des 58. Arbeitswissenschaftlichen Kongresses der Gesellschaft für Arbeitswissenschaft in Kassel, S. 177–180. Dortmund: GfA-Press.
- Kunze, G.; Schmauder, M. 2008: Methode zur dynamischen Sichtfelderfassung und -bewertung für mobile Arbeitsmaschinen unter Einbeziehung der Prozess- und Nutzercharakteristik, Antragsunterlagen zum Projekt der Deutschen Forschungsgemeinschaft 2009–2012, unveröffentlicht
- Kunze, G.; Frenkel, J.; Schubert, C.; Jankov, K. 2009: Using Modelica for Interactive Simulations of Technical Systems in a Virtual Reality Environment. In: Proceedings of the 7th International Modelica Conference, Como (Italy) 2009. Linköping University Electronic Press, 2009.
- Kunze, G.; Hoske, P.; Gubsch, I.; Schmauder, M.; Bürkle, K.; Kamusella, C. 2010a: Prognose und Bewertung der Sicht für mobile Arbeitsmaschinen (Teile 1 und Teil 2). In: BauPortal – Fachzeitschrift der Berufsgenossenschaft der Bauwirtschaft (BG BAU), Heft 9/2010 und Heft10/2010. Erich Schmidt Verlag, Berlin
- Kunze, G.; Schubert C.; Esswein E.; Lehrmann, S. 2010b: Software Architecture for Interactive Simulation of Mobile Machinery. – Commercial Vehicle Technology 2010 – Proceedings of the 1st Commercial Vehicle Technology Symposium [Shaker], 2010

- Scherstjanoi, E.; Bürkle, K. 2012b: „RayCutVis“ Maxscript-Tool, TU Dresden, Professur für Arbeitswissenschaft, unveröffentlicht
- Scherstjanoi, E.; Kamusella, C. 2012b: „Computergestützte Sichtüberprüfung von Erdbaumaschinen nach ISO 5006“. Maxscript-Tool, TU Dresden, Professur für Arbeitswissenschaft, unveröffentlicht
- Schubert, C.; Beitelschmidt, M.; Kunze G. 2010: Handling Kinematic Loops in Mobile Machinery in Real Time – GAMM 2010, Karlsruhe, 2010
- Schubert, C.; Neidhold, T.; Kunze, G. 2011: Experiences with the new FMI Standard Selected applications at Dresden University. In: Proceedings of the 8th International Modelica Conference, Dresden, Germany 2011

Kontakt

Dipl.-Ing. Petra Hoske
Prof. Dr.-Ing. habil. Günter Kunze
Technische Universität Dresden
Professur für Baumaschinen und Fördertechnik
01062 Dresden
<http://tu-dresden.de/bft>

Dipl.-Ing. Kai Bürkle
Prof. Dr.-Ing. Martin Schmauder
Technische Universität Dresden
Professur für Arbeitswissenschaft
01062 Dresden
<http://tu-dresden.de/mw/tla>

Dipl.-Biol. Mark Brütting
Dipl.-Ing. Christian Böser
Institut für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin
der Deutschen Gesetzlichen Unfallversicherung (IFA)
Fachbereich 4 / Referat 4.3: Arbeitswissenschaft/Ergonomie
Alte Heerstraße 111
53757 Sankt Augustin
<http://www.dguv.de/ifa/de/>